DOI: 10.5846/stxb201709021585
吕渡,杨亚辉,赵文慧,雷斯越,张晓萍.不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合关系.生态学报,2018,38(11):3979-3987.
Lü D, Yang Y H, Zhao W H, Lei S Y, Zhang X P.Fine root biomass distribution and coupling to soil physicochemical properties under different restored vegetation types.Acta Ecologica Sinica,2018,38(11):3979-3987.

不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合关系

吕 渡,杨亚辉,赵文慧,雷斯越,张晓萍*
西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

摘要:针对陕北典型黄土丘陵区吴起县主要人工造林和自然封育植被恢复类型,确定 5、15 年和 40 年不同退耕年限下的沙棘、山杏及自然恢复草地样地,进行剖面采样,分析不同植被恢复类型下细根生物量、土壤理化性质,研究了不同恢复类型和不同年限植被细根生物量与土壤理化性质随时间的变异规律及耦合关系。结果表明,(1)总体上,主要造林树种和退耕自然封育草地细根生物量都随林龄和退耕年限的增长呈增加趋势,同年限人工造林树种细根生物量大于自然恢复的草地,不同植被群落细根生物量均表现出随着深度的增加呈指数递减规律。(2)自然封育的草地生态系统土壤含水量大于人工山杏林和沙棘林。人工造林和自然封育植被恢复下,土壤团聚体稳定性都随退耕年限的增加而增强,有机质、全氮、全磷含量也都呈增加趋势,土壤平均含水量则呈减小趋势。(3)细根生物量与土壤容重和团聚体稳定性显著相关,植物细根在土壤结构改善中起到了重要作用。

关键词:黄土高原;退耕年限;植物细根;恢复方式;团聚体稳定性;土壤理化性质

Fine root biomass distribution and coupling to soil physicochemical properties under different restored vegetation types

LÜ Du, YANG Yahui, ZHAO Wenhui, LEI Siyue, ZHANG Xiaoping*
State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry Universit, Yangling 712100, *China*

Abstract: In this study, according to the main types of artificial afforestation and natural enclosure vegetation restoration in Wuqi county in a typical loess hilly region of northern Shaanxi, samples of *Hippophae reamnoides* and *Prunus armeniaca* forests and natural restoration grassland under different cropping years after 5, 15, and 40 years were selected and sampled to determine soil profiles. The fine root biomass and soil physicochemical properties were analyzed, and variations in the regularity and coupling relationships between samples were evaluated under different restoration types and at different years. The results were as follows: (1) In general, the fine root biomass of abandoned grassland and *P. armeniaca* forests increased with an increase in the number of abandoned years and stand age. The fine root biomass of artificial tree species was larger than that of natural restoration grassland, and the biomass showed a decreasing exponential law with increasing depth. (2) The soil water content of the grassland ecosystem was significantly higher than that of artificial *P. armeniaca* and *H. reamnoides* forests. The stability of soil aggregates increased both under artificial afforestation and natural enclosure vegetation coverage, and the content of organic matter, total nitrogen, and total phosphorus were also improved. The soil average water content was reduced with the increase in abandoned years. (3) Fine root biomass showed an obvious correlation with soil bulk density and agglomerate stability, and fine roots played an important role in soil structure

基金项目:国家自然科学基金项目(41440012)
收稿日期:2017-09-02; **网络出版日期**:2018-02-26
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangxp@ ms.iswc.ac.cn

improvement.

Key Words: the Loess Plateau; abandoned years; fine root; vegetation recovery and restoration; soil aggregate stability; soil physical and chemical properties

黄土高原地形破碎,植被稀疏,降水少而集中,水土流失严重,生态功能失调。为了遏制严重的水土流失,受国家政策引导,1999 年后该区进行了大规模的退耕还林/草活动。黄土高原的植被覆盖度明显增加[1-2],与 1957—1979 年间对比,黄河中游头道拐至花园口站间的来水来沙量,2000—2012 年分别减少约 55% 和 95%[3]。黄河中游减水减沙量中,生态建设和植被恢复发挥了重要作用[4-5]。而一个可持续的、功能协调的生态系统,将是黄河维持稳定输沙量的关键[6]。

研究表明,植物根系产生并输入土壤的有机碳是地上部分的 2.3 倍[7]。张小全通过对 100 多个不同气候带的森林生态系统根系生产情况的研究表明,细根(≤2 mm)生产是土壤养分的重要来源[8]。在生态系统结构和功能进化中,根系较地表部分对物质循环和能量流动具有更重要的意义[9]。近年来很多学者详细研究了影响根系生物量的因素,尤其是不同的抚育措施对其的影响。Rewald 认为混交林根系生物量一般比纯林高[10];Persson 等人的研究表明连栽这种抚育措施对林木根系的发育也有促进作用[11]。在根系生物量的动态变化方面,有学者认为林木根系生物量是随着年龄的增加而增加的,到一定年限达到最大然后逐渐下降[12]。关于植物根系与土壤性质的关系也有很多研究,不同气候环境、不同类型植物根系对土壤性质的影响有一定差异。韦兰英研究了子午岭不同演替阶段草地植被与土壤环境的关系,结果表明根系对土壤表层水分与容重的影响较大[13];李勇对油松林的研究证明,根系改善土壤物理性质的效应在剖面中呈指数递减规律[14];韩凤鹏在神木六道沟流域对退耕 30 年的长芒草坡地和裸地坡面的对比研究结果显示,有根系存在的土壤养分状况优于无根系存在的土壤[15];葛晓改在三峡库区对不同林龄的人工油松林与邓强等在黄土高原对四种不同植被区典型群落的研究均认为,根系生物量与土壤养分含量呈正相关[16-17];王丽霞在对沙棘的研究中发现,沙棘林由于根系独特的固氮作用,能加速土壤养分循环,并显著改善土壤持水能力[18]。有关植物-土壤的研究,多数集中于地表部分的群落演替特征、演替过程中土壤性质的变化两方面[19],而不同恢复模式下根系与土壤理化性质的契合关系的研究,主要集中在不同地带的不同植物群落或某一特定群落根系与土壤性质的关系,从水土保持角度对不同退耕方式、不同植被恢复类型下根系和土壤性质关系在时间过程中的对比分析还有不足。如何从水土保持和生态系统可持续性角度理解植被根系与土壤水文物理性质的变化规律,认识植被恢复-土壤改善-水土保持功能间的耦合特征还需要深入探讨。

吴起县在黄土高原实施退耕还林/草工程中极具代表性,迄今为止,对吴起植被的研究主要集中在退耕过程中土地利用及土壤性质的变化,而不同覆被和演替阶段下植物细根分布及其生物量与土壤理化性质关系的研究还不够。本试验选择吴起县自然草地、人工沙棘、人工山杏等主要退耕模式和造林树种,分析不同演替阶段土壤剖面上的植被细根垂直分布特征与土壤理化性质的变化规律,探讨演替过程中根系与土壤理化性质的契合关系,为了解这 3 种主要植被类型的内在关系与对土壤改善作用的潜力,深入理解该区植被恢复的生态水文过程,黄土高原生态建设和水土保持效益评价、合理的土地利用规划提供理论支持。

1 研究区简介

研究区位于陕西省吴起县(107°39′—108°32′E,36°34′—37°24′N),该区属半干旱黄土丘陵沟壑区,毛乌素沙地南缘农牧过渡地带,地处渭河一级支流北洛河上游。吴起县总面积 3792 km^2,海拔 1233—1809 m。该区属中温带大陆性季风气候,年均气温 7.8℃,年均日照时数 2400 h。多年平均降雨量 478.3 mm,相对集中在 7—9 月份,约占全年降水量的 62.4%。无霜期短,平均为 146 d。干旱、霜冻、冰雹、大风、暴雨等自然灾害频繁发生。土壤类型主要为黄绵土。

自 1998 年实施退耕还林/草政策以来,该县土地利用和土地覆盖发生了巨大变化。截止 2010 年,退耕还林面积达到 11.68 万 hm^2,占县域面积的 30.82%[20]。所在的北洛河流域上游植被覆盖率也已由 1995 年的 20.2%,提高到 2014 年的 51.2%[21];退耕还林前后,该区域年侵蚀输沙均值下降了 80.4%,从 1980—2002 年间的 12.0×10^3 t km^{-2} a^{-1},下降到 2003—2011 年间的 3.2×10^3 t km^{-2} a^{-1}[22];除了大面积退耕自然封育草地,沙棘、山杏等是吴起县主要退耕造林树种,其中沙棘纯林面积占该县退耕还林总面积的 80.3%[20]。

2　研究方法

2.1　样地设置

选退耕草地、主要造林树种为沙棘、山杏等植被类型的不同年限样地,在保证立地条件相似的前提下,在均质程度高的样地中选择种群分布较均匀的最具代表性的样方,每种植被类型选择一块样地进行调查。草本群落采用 1 m×1 m 样方,沙棘群落采用 5 m×5 m 样方,山杏林地群落采用 20 m×20 m 样方,样地详细信息见表 1。经过初步确认勘察后,于 2016 年 6 月 20 日至 6 月 25 日、7 月 21 日至 7 月 31 日两个时段对样地进行了野外采样,这两时段均晴朗无雨,数据间差异不大,可以进行分析对比。

表 1　不同植被类型样地概况

Table 1　Status of different vegetation types

样地 Stand	郁闭度 Canopy density/%	草本层盖度 Underground coverage/%	株行距 Spacing/m	年限 Age/a	海拔 Altitude/m	坡度 Gradient/(°)	坡向 Aspect	主要草本植物种类 Main herb species
AL5	—	30	—	5	1478	9	阳坡	狗娃花 猪毛蒿 茭蒿
AL15	—	45	—	15	1401	20	阳坡	甘草 长芒草 胡枝子
AL40	—	65	—	40	1405	22	半阴坡	长芒草 冰草 萎陵菜
H15	75	10	1×1.5	15	1550	25	阳坡	狗娃花 黄蒿 菟丝子
P15	40	25	2×3	15	1385	25	阳坡	茭蒿 胡枝子 远志
P40	77	30	2×3	40	1432	24	阳坡	茭蒿 远志 长芒草

AL5:撂荒 5 年草地,5-year-old abandoned grassland; AL15:撂荒 15 年草地,15-year-old abandoned grassland; AL40:撂荒 40 年草地,40-year-old abandoned grassland; H15:退耕 15 年沙棘纯林,15-year-old *H. reamnoides*; P15:退耕 15 年山杏纯林,15-year-old *P. armeniaca*; P40:退耕 40 年山杏纯林,40-year-old *P. armeniaca*,在下文的图表中均适用

2.2　细根收集与处理

采用内径 7 cm、高 10 cm 的根钻进行根系采集。在灌木和林地群落采集根系时,打钻的地点距离代表株主干为 0.5 m,将空间异质性带来的差异减少到最低。总取样深度为 100 cm,按每 20 cm 深度共收集 5 层。由于直径≤2 mm 细根是植物摄取土壤水分养分的重要途径[23],因此室内测定主要针对细根开展。用 0.2 mm 筛子冲洗,挑出杂物捡出全部细根(直径≤2 mm),装入纸袋,在 75℃ 下烘干 48 h 至恒重,天平称量后录入数据以备分析。细根生物量(g/m^2)= 每根土芯中细根干物质量(g)/{[π×[0.07(m)/2]^2]}。

2.3　土壤理化性质测定

选择土壤容重、自然含水量、团聚体平均重量直径及有机质、全氮、全磷、全钾含量等土壤理化性质基础指标进行分析。

同一样地内挖取土壤剖面,按相同分层方式用小铝盒(直径 46 mm×高 25 mm)收集土样并测量湿重,带回实验室后放入 105℃ 烘箱中烘干至恒重,计算土壤自然含水量;同一土壤剖面上相同分层方法,用环刀(100 cm^3)取原状土,采用环刀法测定土壤容重;同时用大铝盒(直径 80 mm×高 50 mm)取土样带回室内,用干湿筛法测定土壤水稳性团聚体,并计算团聚体平均重量直径(MWD)。剖面上每层样品的土壤样品采集均取 3 个重复。土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定,全氮采用半微量开氏法测定,全磷测定采用钼锑抗比色法。上述土壤理化性质的具体测定方法见土壤农化分析手册[24]。

2.4 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据整理,采用 SPSS 21 中 LSD 方法检验不同土地利用类型同一土层及同一土地利用类型不同土层细根生物量与土壤理化性质间差异性(α = 0.05),采用 Spearman 法进行双变量相关性分析,并对相关性进行显著性检验。采用 Origin 8.0 软件绘图。

3 结果与分析

3.1 不同植物群落细根生物量垂直分布特征

受乔、灌、草植被类型和年限影响,植物总细根生物量大小顺序为 40 年山杏林>15 年沙棘林>40 年草地>15 年山杏林>15 年草地>5 年草地,相应生物量分别是 2203>1847>907>821>545>343 g/m^2,如图 1 所示。显著性检验结果表明,总体上,人工林地的群落细根生物量显著大于天然恢复的草地(P<0.05),不同恢复年限的草地群落、山杏群落的细根生物量表现出随着退耕年限的增加而增加的态势。

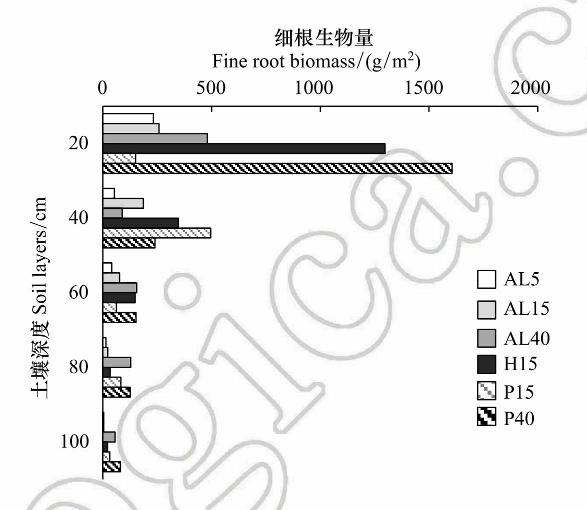


图 1 不同植被类型群落细根生物量的分层分布规律

Fig.1 The vertical root biomass distribution diagram of different vegetation types

土壤剖面上,6 样地植物群落的细根生物量均表现出随着土层的增加逐渐降低趋势,如图 1 所示。除 15 年人工山杏林外,其他不同植被类型样地的细根生物量主要分布在 0—20 cm 的近地面浅表层,其细根生物量占剖面根系总生物量的 52%—81%。15 年人工山杏林细根生物量则主要分布在 20—40 cm 深度,细根生物量占总细根生物量的 40%。

回归分析发现,不同植被类型剖面上细根生物量随着土壤深度的增加均呈指数递减规律,如表 2 所示,与 Hodge 等对植物细根在土壤中垂直分布规律的研究结论相吻合[25-26]。15 年山杏林与 40 年退耕草地根系生物量在土层剖面上形成双峰分布模式,对比其他样地,与土壤深度的指数函数模拟关系稍差。其原因可能与样地选择有关,也可能与物种习性及其形成群落的细根垂直分布特征有关。有分析认为,人工山杏林群落根系主要集中在 10—70 cm 土层中,而表层分布较少[27]。山杏树种高大乔木的生物学特性,导致其根系主要分布于 20—40 cm,指数关系拟合较差,而 40 年山杏样地地表草本植被的覆盖度相对较高,可能是模拟关系较好的重要原因。本研究中自然恢复 40 年的草地是以长芒草为优势种的群落,其根系都主要集中在 0—50 cm[15,28],在剖面分布相对较深,可能是拟合关系较差的原因。

表 2 不同植被类型草地细根生物量垂直分布的指数拟合

Table 2 Exponent fitting of vertical fine roots biomass distribution of different vegetation types

样地 Stand	拟合方程 Exponent fitting	相关系数(R^2) Correlation coefficient	样地 Stand	拟合方程 Exponent fitting	相关系数(R^2) Correlation coefficient
AL5	$y = 544.5e^{-0.048x}$	0.96	H15	$y = 3275.3e^{-0.053x}$	0.98
AL15	$y = 1240.6e^{-0.054x}$	0.93	P15	$y = 455.5e^{-0.025x}$	0.56
AL40	$y = 444.5e^{-0.02x}$	0.60	P40	$y = 1650.6e^{-0.033x}$	0.81

y 为细根生物量(g/m^2); x 为土壤深度(cm)

3.2 不同植物群落内土壤物理性质的变化规律

3.2.1 土壤容重及含水量的变化特征

土壤容重是土壤理化性质的综合反映指标,腐殖质多,疏松多孔,容重越小,越紧实,容重越大。6 个样地的土壤容重在 100 cm 土层中的变化基本可以表现出,表层容重较小,随着土层深度加深容重基本呈现增大的

趋势,如图 2a 所示。

一般来说,随着退耕年限的增长,土壤容重趋于变小;随着剖面深度的增加,土壤容重变大[29-30]。本研究中土壤容重在剖面上和随着年限而发生的变化表现不一致。同年限的草地、沙棘、山杏林下土壤容重差异不显著。系列退耕草地之间容重差异并不显著。剖面上,15、40 年退耕草地随土层加深容重变化不显著,而 5 年退耕草地表层容重显著小于下层,可能与农地翻耕措施对剖面土壤的改造作用密切相关。2 个山杏林样地随土层加深容重表现出波动中增大趋势,变化幅度较小,范围在 1.16—1.28 g/cm^3。显著性检验的结果显示,两样地容重随剖面加深和退耕年限的增长容重变化均没有明显的趋势,可能与山杏作为经济树种,人为采摘中对土壤严重的踩踏作用相关。沙棘的独特生物特性导致样地受人为影响因素较小。15 年沙棘林的容重在剖面上从表层的 1.0 g/cm^3,增加到 1 m 深土层的 1.38 g/cm^3,表层容重显著小于下层及其他几种利用类型。而凋落物的积累能增加土壤有机质,导致容重出现差异,表层较小的容重与沙棘林地表面的枯枝落叶储量有关。卢立娜在内蒙古的研究也表明沙棘主要改善了 0—10 cm 土层的土壤物理性质[31],支持了本研究的结论。

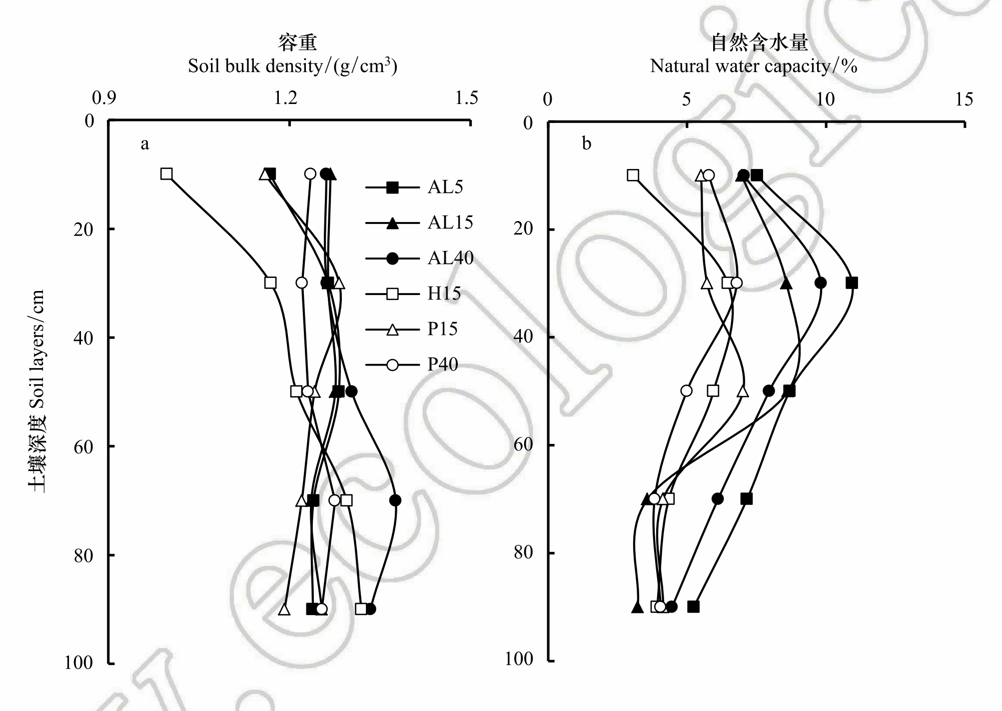


图 2　不同植被类型土壤剖面容重和水分性质

Fig.2　Soil bulk density and water properties in the profile of different vegetation types

不同植物群落下土壤剖面上土壤自然含水量的变化趋势如图 2b 所示。6 个样地土壤自然含水量在剖面上的变化比较一致,均表现出随着土层加深土壤含水量先增加,在 20—40 cm 土层达到最大,之后随着土层加深而减小的趋势。整体来看,随着退耕年限的增加,土壤平均含水量呈减小趋势,主要原因是随着植被恢复,覆盖度的增加使蒸腾加大,另一方面由于地表枯落物增多,减少了水分的入渗。而林地含水量显著小于草地($P<0.05$)。这和傅伯杰等在延安羊圈沟对不同土地利用对土壤水分影响的研究结果一致[32]。

3.2.2　土壤团聚体稳定性变化特征

团聚体的稳定性是土壤抗蚀能力的重要指标。水稳性团聚体平均重量直径(MWD)是反映土壤团聚体大小分布的常用指标,值越大表明土壤团聚体稳定性越强。

不同植被群落下土壤水稳性团聚体 MWD 的变化情况如图 3 所示,不同植被群落土壤团聚体湿筛 MWD 均表现出随深度的增加而减小趋势。随着演替的进行,退耕草地系列中除 5、15 年草地 60—100 cm 土层 MWD 差异不显著,剖面上其余各层土壤团聚体稳定性均显著增强($P<0.05$),人工山杏林群落表层 0—40 cm

的 MWD 值也显著增加。相同退耕年限下,15 年人工山杏林地表层(0—20 cm)的 MWD 显著小于 15 年人工沙棘林与自然恢复的草地($P<0.05$)。40 年退耕草地每层的 MWD 均显著大于 40 年人工山杏林。黄土高原已有的研究表明,植物根系尤其是细根可以提高土壤的水稳性团粒含量,对土壤结构的改善作用大[33]。对比本研究中细根分布与土壤团聚体的相关关系,可知植物细根在土壤的结构变化中具有重要作用。

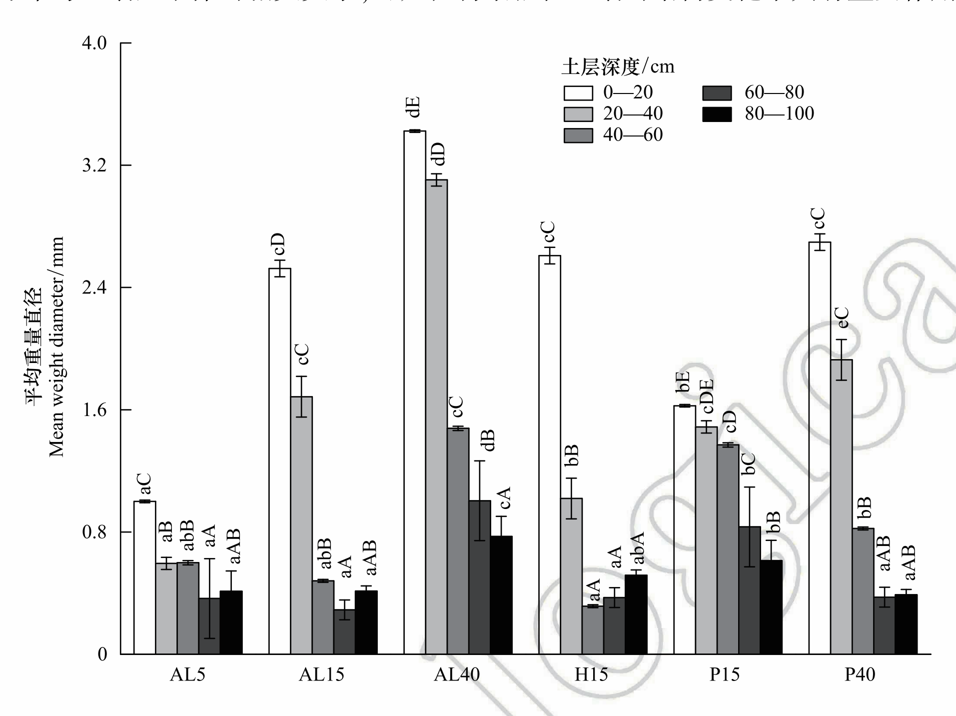


图 3 不同植被下土壤剖面水稳性团聚体稳定性变化

Fig.3 Changes of soil water-stable aggregate stability in the profile under different vegetation types

不同大写字母表示同一群落不同土层间有 $P<0.05$ 显著差异,不同小写字母表示同一土层不同群落间有 $P<0.05$ 显著差异

从组成水稳性团聚体的不同径级的含量变化中发现,随着植被的恢复,MWD 的变化与大团聚体(>5 mm)和 0.25—0.5 mm 的团聚体的含量变化趋势基本一致,而与小团聚体(<0.25 mm)的含量变化趋势相反,如图 4 所示,这与李裕元等在神木的研究结果一致[29]。这就意味着,随植被恢复年限的增加,土壤的团聚体水稳性增加,组成也更加合理。土壤团聚体稳定性增强,表明植被的逐渐恢复能够改善土壤的结构,这与前人的研究结果一致[34]。图 4 还可以看出,同为 15 年年限,100 cm 土层上,人工沙棘林 MWD 稍低于退耕恢复草地和人工山杏林地。同为 40 年年限,人工山杏林地明显低于退耕草地。结合图 3 可知,在 100 cm 深剖面的平均水平上,通过自然封育模式恢复的天然草地可以显著改善土壤的物理结构性质,相对于人工沙棘林,人工山杏林对土壤团聚体稳定性的改善作用更好。

3.3 不同植物群落内土壤养分的变化

不同植被类型下土壤有机质的变化规律如图 5 所示。100 cm 剖面平均情况下,5、15 年和 40 年系列退耕草地群落内有机质含量分别为 4.75、4.15 g/kg 和 6.27 g/kg,15、40 年人工山杏林及 15 年沙棘灌木林地的土壤有机质含量分别为 6.1、3.52 g/kg 和 4.71 g/kg。基本表现出随着退耕年限增加,有机质含量显著增加的趋势,在退耕草地上表现得尤其明显,山杏林没有这样的趋势,可能与样地的立地条件和其他人类活动有关。同年限的 3 种覆被类型比较,山杏林有机质含量最高。研究表明,根系可以通过对土壤环境的改善来提高土壤对养分的运移效率,还可以通过自身对养分的吸收积累,在死亡后再还给土壤。因此土壤养分与根系分布状况有关。

从不同植被类型土壤剖面来看,表层 0—20 cm 土壤有机质含量显著大于其他土层($P<0.05$),20 cm 以下深度 6 种植被类型间有机质含量差异不显著。有机质含量随土层深度增加而呈线性降低趋势,与刘效东在我

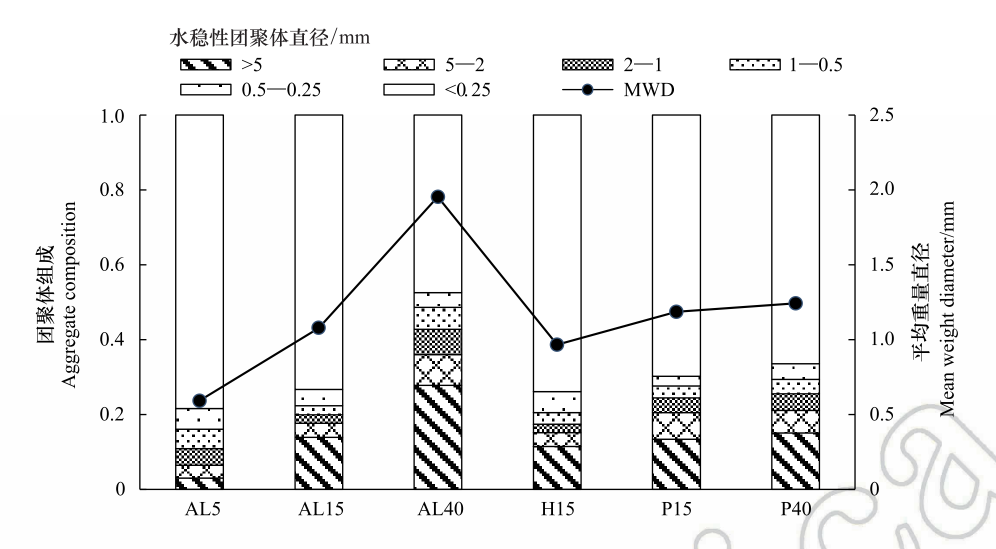


图 4　不同植被类型土壤水稳性团聚体组成与稳定性变化

Fig.4　Changes of soil water-stable aggregate constituents and stability under different vegetation types

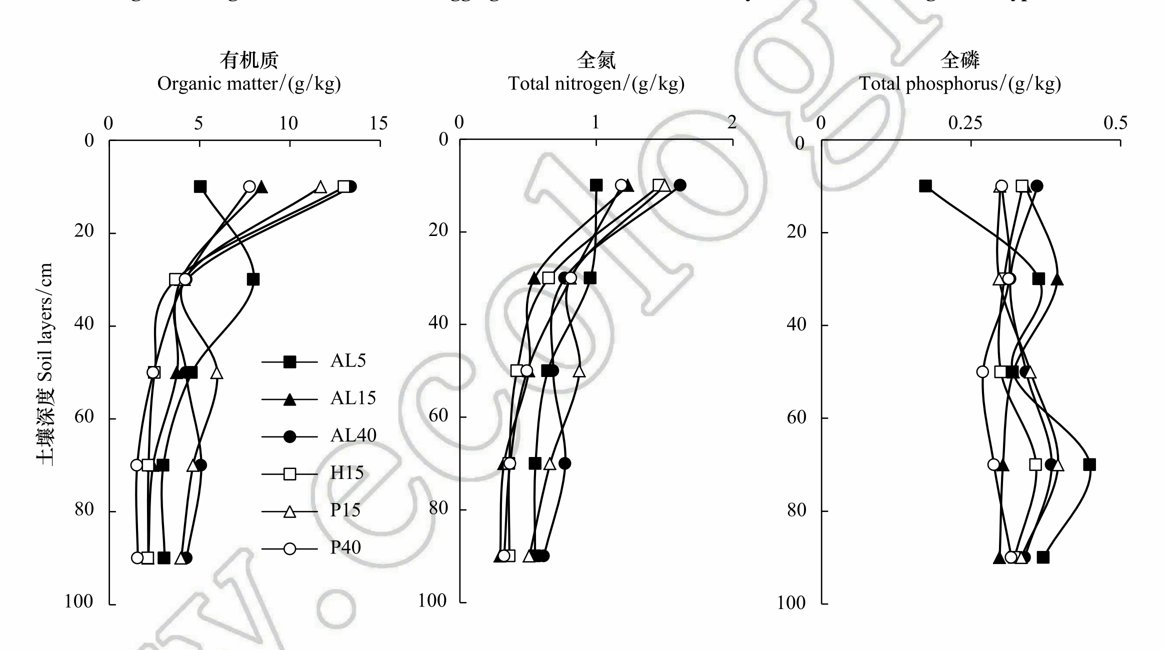


图 5　不同植物群落内土壤养分含量变化

Fig.5　Changes of soil nutrient content under different vegetation types

国南亚热带对森林生态系统的研究结果一致[35],与凋落物在土壤表层聚集分解,土壤有机质具有表聚性特征有关。5 年退耕草地土壤有机质含量在剖面上 20—40 cm 达到最大值,可能与长期农耕活动对剖面上的有机质积累的影响有关。整体上可以看出,随植被群落的演替,退耕草地土壤表层(0—20 cm)有机质含量显著增加($P<0.05$),而 20—100 cm 土层的土壤有机质含量则表现出波动中轻微的增加趋势。图 5 表示了全氮含量的变化规律,由于土壤中的氮主要来源于枯枝落叶,所以 6 样地中全氮含量大小与有机质一致,并且随着土层深度的增加含量逐渐降低。在退耕草地的恢复序列中,随着恢复年限的增加,土壤 0—20 cm 土层的剖面全氮含量增加,20—100 cm 土壤全氮含量变化不明显。这可能是由于在退耕初期,植被生长及土壤的微生物活动消耗了土壤中的 C、N,枯枝落叶的分解不能及时补充,后期植被生长茂盛,枯枝落叶增加,土壤有机质和全氮增加。15 年的退耕草地全氮含量显著大于 15 年的沙棘林和 15 年的山杏林($P<0.05$)。0—100 cm 土层的土壤全磷含量随深度变化复杂,没有明显的变化规律,如图 5 所示。全磷含量在 6 种类型的植物群落中也没有明显差异。最小值出现在自然恢复 5 年的草地群落 0—20 cm 土层。主要原因是磷在土壤中迁移缓慢,其变

异主要是由成土母质及成土过程中的生物作用决定,环境对其含量的影响较小。

3.4 植物细根生物量与土壤理化性质耦合关系

植被恢复过程也即植物体尤其根系改善土壤理化性质的过程[19]。研究区群落细根生物量与土壤理化性质的相关关系如表 3 所示。一般来说,土壤容重与含水量是影响细根分布的关键因素。本研究发现,3 种植被类型下的细根生物量与土壤容重呈显著负相关,但是与土壤含水量不存在相关性,这与苏纪帅等在宁夏大罗山的研究相似,可能是由于植被类型及其相应的土壤含水量差异引起的[36]。而细根生物量与土壤养分的相关性也不强,表明该地区容重是限制根系生长发育的关键因子,养分对细根生物量的积累影响不大。另外,本研究中,细根生物量与土壤团聚体稳定性参数 MWD 呈极显著正相关,表明植被恢复通过细根主要改良了紧实的土壤,强化了土壤抗冲抗蚀性,对防治水土流失有积极作用和重要意义。因为一方面细根本身可以对土壤颗粒产生固结作用,另一方面,植物根系的代谢也会产生有机化合物,有效胶结土壤颗粒。有机质与全氮含量呈极显著的正相关关系。另外,土壤团聚体 MWD 与土壤的有机质含量、全氮含量均呈显著或极显著正相关关系,说明植被恢复背景下,土壤有机质、全氮对土壤水稳性团聚体稳定性均有影响,这是因为团聚体的形成赖于有机质的胶结作用,这与陈山在红壤区和王涛在川东紫土丘陵区得到的结论一致[37-38]。

表 3 群落细根生物量与土壤性质的相关关系

Table 3 The correlation between fine root biomass and soil properties

变量 Variable	细根生物量 Fine root biomass	自然含水量 Natural water capacity	平均重量直径 Mean weight diameter	容重 Bulk density	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus
细根生物量 Fine root biomass	1.00						
自然含水量 Natural water capacity	0.13	1.00					
平均重量直径 Mean weight diameter	0.42**	0.35*	1.00				
容重 Bulk density	-0.36*	0.14	-0.27	1.00			
有机质 Organic matter	0.19	0.25	0.73**	-0.28	1.00		
全氮 Total nitrogen	0.27	0.30	0.77**	-0.34	0.96**	1.00	
全磷 Total phosphorus	-0.12	0.13	-0.03	0.39**	0.11	0.02	1.00

"**"表示在 0.01 显著水平下相关,"*"表示在 0.05 显著水平下相关

4 结论

(1)总体上,退耕自然封育草地和人工山杏林地,细根生物量都随着退耕年限的增长呈现增加趋势。人工沙棘林和人工山杏林的细根生物量大于退耕草地。不同植被群落细根生物量均表现出随着深度的增加呈指数递减规律。

(2)同一退耕年限下,自然封育的草地生态系统土壤含水量显著大于人工山杏林和沙棘林;草地和山杏林群落中,土壤团聚体稳定性都随着退耕年限的增加而增强,并且组成更加合理,有机质、全氮、全磷含量也都呈增加趋势,平均土壤含水量则呈减小趋势;各个样地中土壤有机质、全氮随着土层加深而逐渐减少,全磷含量在剖面的变化无明显规律。

(3)细根生物量与土壤容重和团聚体稳定性有显著的相关关系,植物细根在土壤结构改善中起到了重要作用;土壤团聚体稳定性与土壤养分含量关系密切,呈极显著正相关关系。

参考文献(References):

[1] Chen N, Ma T Y, Zhang X P. Responses of soil erosion processes to land cover changes in the Loess Plateau of China: a case study on the Beiluo River basin. CATENA, 2016, 136: 118-127.

[2] Wang Z J, Jiao J Y, Rayburg S, Wang Q L, Su Y. Soil erosion resistance of "Grain for Green" vegetation types under extreme rainfall conditions on the Loess Plateau, China. CATENA, 2016, 141: 109-116.
[3] 岳晓丽. 黄河中游径流及输沙格局变化与影响因素研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
[4] Feng X M, Wang Y F, Chen L D, Fu B J, Bai G S. Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau. Geomorphology, 2010, 118(3/4): 239-248.
[5] 余新晓, 毕华兴, 朱金兆, 吴斌. 黄土地区森林植被水土保持作用研究. 植物生态学报, 1997, 21(5): 433-440.
[6] Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. Nature Geoscience, 2016, 9(1): 38-41.
[7] Kätterer T, Bolinder M A, Andrén O, Kirchmann H, Menichetti L. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 141(1/2): 184-192.
[8] 张小全, 吴可红. 森林细根生产和周转研究. 林业科学, 2001, 37(3): 126-138.
[9] 罗永清, 赵学勇, 王涛, 李玉强, 左小安, 丁杰萍. 植物根系分解及其对生物和非生物因素的响应机理研究进展. 草业学报, 2017, 26(2): 197-207.
[10] Rewald B, Leuschner C. Belowground competition in a broad-leaved temperate mixed forest: pattern analysis and experiments in a four-species stand. European Journal of Forest Research, 2009, 128(4): 387-398.
[11] Persson H Å. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. Plant and Soil, 1983, 71(1/3): 87-101.
[12] Børja I, Nilsen P. Long term effect of liming and fertilization on ectomycorrhizal colonization and tree growth in old Scots pine (Pinus sylvestris L.) stands. Plant and Soil, 2009, 314(1/2): 109-119.
[13] 韦兰英. 黄土高原不同演替阶段草地植被细根分布及其生态特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
[14] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟. 黄土高原油松人工林根系改善土壤物理性质的有效性模式. 林业科学, 1993, 29(3): 193-198.
[15] 韩凤朋, 郑纪勇, 张兴昌. 黄土退耕坡地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响. 农业工程学报, 2009, 25(2): 50-55.
[16] 葛晓改, 黄志霖, 程瑞梅, 曾立雄, 肖文发, 谭本旺. 三峡库区马尾松人工林凋落物和根系输入对土壤理化性质的影响. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3301-3308.
[17] 邓强. 黄土高原 4 种植被区典型群落细根生物量和年生产量及其与环境因子关系研究[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2015.
[18] 王丽霞. 沙棘根系结构特点及对土壤理化性质的影响. 北方园艺, 2008, 32(12): 41-43.
[19] 田均良. 黄土高原生态建设环境效应研究. 北京: 气象出版社, 2010.
[20] 郭建英, 李锦荣, 刘铁军, 孙保平, 梁占岐, 赵岩. 退耕还林工程建设对吴起县土地利用/覆被变化及其土壤侵蚀的影响. 水土保持研究, 2013, 20(5): 1-6.
[21] 闫瑞, 张晓萍, 闫胜军, 赵文慧. 1995—2014 年北洛河流域植被恢复的地形分布特征. 东北大学学报: 自然科学版, 2016, 37(11): 1598-1603.
[22] 蔺鹏飞. 北洛河上游次洪水沙过程对生态恢复的响应研究[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2015.
[23] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1997, 94(14): 7362-7366.
[24] 南京农业大学. 土壤农化分析(第二版). 北京: 农业出版社, 1990.
[25] Hodge A. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. New Phytologist, 2004, 162(1): 9-24.
[26] 韦兰英, 上官周平. 黄土高原不同演替阶段草地植被细根垂直分布特征与土壤环境的关系. 生态学报, 2006, 26(11): 3740-3748.
[27] 赵忠, 李鹏, 王乃江. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征的研究. 应用生态学报, 2000, 11(1): 37-39.
[28] 姜慧敏. 豆科牧草与禾本科牧草的根系特征与生理生态指标的比较研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2013.
[29] 李裕元, 邵明安, 陈洪松, 霍竹, 郑纪勇. 水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响. 生态学报, 2010, 30(16): 4306-4316.
[30] 邢菊香, 郭建英, 赵杏花, 蓝登明. 黄土丘陵区退耕还林后土壤物理性质恢复特征的研究——以陕西省吴起县为例. 内蒙古农业大学学报, 2010, 31(1): 41-46.
[31] 卢立娜, 赵雨兴, 胡莉芳, 李维向, 石麟, 任余艳, 韩易良, 贺晓辉. 沙棘(Hippophae rhamnoides)种植对鄂尔多斯砒砂岩地区土壤容重、孔隙度与贮水能力的影响. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1171-1176.
[32] 傅伯杰, 王军, 马克明. 黄土丘陵区土地利用对土壤水分的影响. 中国科学基金, 1999, (4): 225-227.
[33] 李勇, 武淑霞, 夏侯国风. 紫色土区刺槐林根系对土壤结构的稳定作用. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 1-7.
[34] 由政, 姚旭, 景航, 谷利茶, 王国梁. 不同演替阶段群落根系分布与土壤团聚体特征的协同变化. 水土保持研究, 2016, 23(6): 20-25, 31-31.
[35] 刘效东, 乔玉娜, 周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用. 植物生态学报, 2011, 35(12): 1209-1218.
[36] 苏纪帅, 程积民, 高阳, 仇智虎, 曹怀清. 宁夏大罗山 4 种主要植被类型的细根生物量. 应用生态学报, 2013, 24(3): 626-632.
[37] 陈山, 杨峰, 林杉, 柳淑蓉, 汤水荣, 蔡崇法, 胡荣桂. 土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响. 水土保持学报, 2012, 26(5): 211-216.
[38] 王涛, 何丙辉, 秦川, 李天阳. 不同种植年限黄花生物埂护坡土壤团聚体组成及其稳定性. 水土保持学报, 2014, 28(5): 153-158.